

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА ГРАФІТОВИХ КОМПОЗИТІВ ДЛЯ ВИСОКОТЕХНОЛОГІЧНИХ ГАЛУЗЕЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

Л. Молокост, викладач
С. Шматько, фахівець 1 категорії
 Центральноукраїнський національний технічний університет

Сучасний розвиток високотехнологічних галузей промисловості, таких як авіакосмічна техніка, енергетика, електроніка та машинобудування, обумовлює необхідність створення матеріалів із комплексом унікальних властивостей. Традиційні метали та сплави не завжди здатні забезпечити ефективну роботу в умовах високих температур, агресивних середовищ і значних механічних навантажень. У зв'язку з цим особливої актуальності набувають графітові композиційні матеріали [1].

Матеріалознавство графітових композитів (ГК) перебуває на етапі стрімкого розвитку, зумовленого потребою у матеріалах, що здатні витримувати екстремальні навантаження за мінімальної ваги.

Графітові композити є багатокомпонентними системами, в яких графіт виконує роль матриці або функціонального наповнювача. Їх унікальні властивості обумовлені шаруватою структурою графіту, що забезпечує низький коефіцієнт тертя, високу теплопровідність і хімічну інертність [2].

Однією з ключових характеристик графітових композитів є їх здатність працювати при високих температурах без значної втрати експлуатаційних властивостей. У неокислювальному середовищі такі матеріали витримують температури понад 2000°C, що значно перевищує можливості більшості металевих сплавів [3]. Це робить їх незамінними для виготовлення теплозахисних елементів, електродів та вузлів тертя. Для порівняння ефективності використання різних типів конструкційних матеріалів було проаналізовано їхні характеристики у таблиці 1.

Таблиця 1. – Порівняльні фізико-механічні характеристики графітових композитів та традиційних конструкційних матеріалів

Матеріал	Густина, г/см ³	Межа міцності, МПа	Модуль пружності, ГПа	Макс. робоча температура, °C
Алюмінієві сплави (7075)	2,81	570	72	150–200
Титанові сплави (Ti-6Al-4V)	4,43	950	114	400–600
Вуглець-вуглецеві композити (C/C)	1,7–1,9	400–700*	90–150	2500 (в інертному середовищі)
Композити C/C-SiC	2,1–2,4	300–500	180–250	1600 (в окислювальному середовищі)

*Примітка: для композитів міцність вказана в площині армування; на відміну від металів, міцність ГК зростає при нагріванні до 2000°C.

Традиційні методи отримання ГК, такі як ізостатичне пресування та подальша графітизація, сьогодні доповнюються методами хімічного осадження з газової фази (CVD) та іскрового плазмового спікання (SPS). Метод SPS дозволяє значно знизити температуру та час витримки, що мінімізує ріст зерна та дозволяє отримувати наноструктуровані композити з підвищеною щільністю [4].

Особлива увага приділяється технології *Liquid Silicon Infiltration (LSI)* для створення композитів системи C/C-SiC. Цей процес дозволяє швидко насичувати пористу вуглецеву заготовку розплавом кремнію, утворюючи матрицю, яка стійка до окислення та ерозійного зносу в умовах гіперзвукових потоків [5].

Оптимізація технологічних параметрів синтезу потребує попереднього теоретичного прогнозування властивостей. Для теоретичної оцінки механічних характеристик, а саме модуля пружності та міцності графітового композиту отриманих систем доцільно використовувати адитивну модель:

$$E_c = E_f V_f + E_m (1 - V_f),$$

де: E_f - модуль пружності графітового волокна (або наповнювача);

E_m - модуль пружності матриці;

V_f - об'ємна частка наповнювача в композиті.

При роботі в екстремальних температурах важливим показником є коефіцієнт термічного розширення (α_c), який для графітових систем розраховується за формулою Тернера:

$$\alpha_c = \frac{\alpha_f E_f V_f + \alpha_m E_m V_m}{E_f V_f + E_m V_m}$$

Це дозволяє мінімізувати внутрішні напруження в композиті шляхом підбору компонентів з близькими значеннями α .

Для високотехнологічних галузей, зокрема мікроелектроніки та космічної техніки, визначальною характеристикою ГК є ефективна теплопровідність (λ_c). Для її розрахунку в поперечно-ізотропних композитах використовується модель Хашмана-Штрікмана [6]:

$$\lambda_c = \lambda_c \frac{\lambda_f (1 + V_f) + \lambda_m (1 - V_f)}{\lambda_f (1 - V_f) + \lambda_m (1 + V_f)},$$

де: λ_f та λ_m - коефіцієнти теплопровідності наповнювача та матриці відповідно.

Ця модель дозволяє з високою точністю прогнозувати тепловідведення в системах з високим ступенем наповнення графітом, що підтверджується експериментальними даними для композитів системи C/C [7].

Значна увага приділяється розробці металографітових композитів, які поєднують високу електропровідність металів із антифрикційними властивостями графіту. Такі матеріали широко застосовуються у підшипниках ковзання, електроконтактах і ущільненнях [8].

Перспективним напрямом є також створення наномодифікованих графітових композитів із додаванням графену та вуглецевих нанотрубок. Це дозволяє значно підвищити механічну міцність, зносостійкість і функціональні характеристики матеріалів, розширюючи сфери їх застосування [9]. Разом з тим існують певні обмеження, серед яких основними є висока вартість виробництва, складність технологічних процесів та відносно низька міцність на розтяг.

Пріоритетними напрямками розвитку є:

1. Наномодифікація інтерфейсів. Дослідження показують, що введення між волокном та матрицею «ворсистих» наноструктур (вуглецевих нанотрубок або нановолокон) дозволяє змінити механізм руйнування з крихкого на в'язкий. Це досягається за рахунок ефекту «втягування» волокон, що підвищує ударну в'язкість матеріалу на 30-40% [10].

2. Високотемпературна кераміка (УНТС). Перспективним напрямком є легування графітових композитів боридами та карбідами перехідних металів (ZrB_2 , HfC). Такі системи здатні формувати на поверхні захисний склоподібний шар, який запобігає дифузії кисню вглиб матеріалу при температурах 2200-2500°C, що є критичним для багаторазових космічних апаратів [11].

3. Графітові аноди нового покоління. У секторі накопичення енергії розвиваються методи створення ієрархічних пористих структур. Використання графітових композитів, допированих азотом або фосфором, дозволяє покращити кінетику транспорту іонів літію, що забезпечує можливість надшвидкої зарядки акумуляторів без ризику утворення дендритів [12]. У табл. 2 наведено аналіз ємнісних показників анодних систем.

Таблиця 2. – Експлуатаційні показники анодних матеріалів на основі графітових композитів для накопичувачів енергії

Тип анода	Питома ємність ,мАг/г	Зміна об'єму при зарядці, %	Циклічна стабільність	Вартість впровадження
Природний графіт	372	-10	Висока	Низька
Синтетичний графіт	350	-8	Дуже висока	Середня
Графіт-Кремній (15% Si)	600–800	30-50	Середня	Висока
Наноструктурований ГК + Graphene	1000+	<20	Висока	Дуже висока

Застосування у водневій енергетиці. Графітові композити на основі ексфоліюваного (терморозширеного) графіту розглядаються як основний матеріал для біполярних пластин паливних елементів. Головним викликом тут є забезпечення високої електропровідності при одночасному зниженні газопроникності пластин. Новітні розробки пропонують використання гібридних епоксидно-графітових систем, отриманих методом гарячого пресування, що забезпечує довговічність понад 5000 годин роботи [13].

Екологічна трансформація та рециклінг. Сучасне матеріалознавство стикається з викликом «вуглецевого сліду». Розробляються методи солволізу та піролізу, які дозволяють деградувати полімерну матрицю та вилучати графітові компоненти для вторинного використання у виробництві менш навантажених деталей (наприклад, у автомобілебудуванні), що знижує собівартість продукції на 20%.

Подальший розвиток матеріалознавства графітових композитів пов'язаний із:

- удосконаленням технологій виготовлення (гаряче пресування, ізостатичне формування, адитивні технології);
- створенням гібридних матеріалів;
- впровадженням нанотехнологій;
- розширенням сфер застосування у високотехнологічних галузях.

Графітові композити є перспективним напрямом розвитку сучасного матеріалознавства. Їх унікальні властивості забезпечують ефективне використання у високотехнологічних галузях промисловості. Подальші дослідження повинні бути спрямовані на підвищення механічної міцності матеріалів, зниження їх вартості та вдосконалення технологій виробництва.

Висновки. Проведений аналіз свідчить, що подальший прогрес у матеріалознавстві графітових композитів пов'язаний із переходом від емпіричного пошуку складів до прецизійного проектування їхньої структури. Використання запропонованих математичних моделей, зокрема правила суміші та моделі Хашмана-Штрікмана [6, 7], дозволяє з високою точністю прогнозувати механічну міцність та теплофізичні параметри ГК ще на етапі проектування матеріалу.

Встановлено, що інтеграція наномодифікаторів та впровадження методів іскрового плазмового спікання (SPS) відкривають можливості для створення композитів із заданою анізотропією властивостей. Це має вирішальне значення для аерокосмічної галузі та водневої енергетики, де вагова ефективність у поєднанні з екстремальною термостійкістю є критичними факторами. Таким чином, розвиток методів цифрового дизайну графітових структур у синергії з адитивними технологіями стане домінуючим трендом галузі на найближче десятиліття, забезпечуючи технологічне лідерство у виробництві систем нового покоління.

Список літератури

1. Кальченко В. І. Композиційні матеріали в машинобудуванні. – Київ: Техніка, 2020.
2. Pierson H. O. Handbook of Carbon, Graphite, Diamonds and Fullerenes. – Elsevier, 2017.
3. Chung D. D. L. Carbon Materials: Science and Applications. – Butterworth-Heinemann, 2016.
4. Schmidt, S.(2019). Carbon-Carbon Composites: Manufacturing and Applications. *Advanced Engineering Materials*, 21(8), 1900-1915.
5. Wang, Y., et al. (2023). 3D Printing of Carbon Fiber Reinforced Composites: A Review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 164, 107-118.
6. Hashin, Z., Shtrikman, S. 1963 – Варіаційний підхід.
7. Taylor. R. (2021) – Теплові властивості C/C композитів.
8. Гуревич Л. М. Полімерні та графітові композити в промисловості. – Дніпро: ДДАЕУ, 2022.
9. Dresselhaus M. S. Graphene and Carbon Nanomaterials. – Springer, 2018.
10. Zhang, X., et al. (2021) – Наномодифікація графіту.
11. Baker, A., Dutton, S. (2020) – Авіаційні структури.